

연구논문

LCA를 적용한 하천환경영향평가 방법

김성준* · 김명희** · 전용태* · 신선미* · 최용승* · 원찬희*

전북대학교 환경공학과*, 중국 연변대학교 삼림과학과**

(2011년 11월 29일 접수, 2012년 2월 3일 승인)

A Method of River Environmental Impact Assessment using LCA

Sung-Joon Kim* · Ming-Ji Jin** · Yong-Tae Jeon* · Seon-Mi Shin*
· Yong-Seung Choe* · Chan-Hee Won*

Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University*

Department of Forestry Science, Yanbian University, Yanji China 133000**

(Manuscript received 29 November 2011; accepted 3 February 2012)

Abstract

In this research LCA methodology was adapted and analyzed in quantifying estimation of estuarine environment. The analysed objects of estuarine environment were construction methods, facility, and input material into water, and estuarine ecosystem. In this research the function of LCA of estuarine environment was river with the view of controlling water, utilizing water, and hydrophilic function. According to the result of research, environmental damage indicator of facility was decreased 346 Pt from 453 Pt at pre-maintenance to 107 pt at post-maintenance. Among raw and subsidiary materials, remicon, stone-netting bag, and pebbles were showing heavy environmental load in the order. Environmental impact of input material into water system was analyzed from 1,827 Pt environmental load before construction to 1,080 Pt of post-maintenance, and damage indicator was improved at 747 Pt. Water quality was improved from 1,827 Pt (before construction) to 1,080 Pt(after construction), and ecosystem was improved after maintenance. Environmental indicator in ecosystem was analyzed 427 Pt(before construction) to 348 Pt(after construction), and damage indicator of Sumnjingang riverine system was improved as much as 79 Pt. In the conclusion, estuarine environmental monitoring through LCA in the area of facility, input material into water and ecosystem showed that close-to-nature stream was 1,172 Pt better than artificial stream in environmental aspects.

Keywords : ecosystem, environmental damage, environmental impact, LCA(Life Cycle Assessment)

1. 서론

우리나라의 하천정비는 1980년대까지도 용수의 공급과 홍수·가뭄과 같은 자연재해에 대비하여 이수, 치수에 중점을 두어 이루어져서 현재 대부분의 하천들은 콘크리트에 의해 직강화 및 복개되었고 또한 직선화되어 자정작용을 잃고 수질은 악화되었으며, 인위적 훼손에 의해 생태계 및 경관이 파괴되어 하천은 본래의 기능을 상실하였다(박제철 외., 2004)

최근 들어 환경문제의 사회적 부각과 함께 환경에 대한 의식이 높아지면서 하천정비에 있어서도 단지 이수와 치수기능에 그치지 않고 친수공간의 확보 및 단위 생태계로서의 하천의 기능을 강조하고 있으며, 하천 고유의 기능을 복원하는데 힘을 기울이고 있다.

이러한 이유에서 하천환경정비 및 이후의 보존과 관리에 필요한 하천환경조사에 있어서도 환경과 생태계 그리고 인공구조물 등과 같이 하천환경을 구성하는 모든 요소들에 대한 총체적이고 정량적인 조사와 평가가 요구되어 지고 있다. 하지만 현재 하천정비사업의 사전모니터링 작업에서 이루어지고 있는 환경조사는 수계 투입 산출물의 변화, 식생 및 동물의 개체수의 변화를 기록하는 기초적 수준에 머무르고 있으며, 또한 하천의 구성 요소 중 하나인 인공구조물에 대한 환경평가는 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

일부 선진 유럽에서 Eco-indicator 99방법이 개발되었으나 토지이용형태의 변화에 따라 관다발 식물의 변화를 지수화 하여 평가하고 있다. 일본도 이와 유사한 방법을 개발해 사용한 사례가 일부 있는 것으로 알려져 있으나 아직 국내에서는 생태계를 정량적으로 평가하는 기법은 개발된 사례가 없다. 따라서 본 연구에서는 하천 환경을 종합적이고 정량적으로 평가하는 기법을 제시하고, 사례를 통해 검증해 보았다. 첫째, 하천의 수질평가에 있어 전과정평가(LCA)기법을 이용하여 기존의 분석된 수질 오염물질(BOD, TN, TP)들을 자연정화를 고려하여 부영양화 지수로 표현하였다. 둘째, 생태계 평가에

있어 종다양도, 종풍부도를 이용하여 개체수의 증감량을 단일 지수로 분석하여 하천 생태계를 DI(Damage Index)로 평가 하였다. 셋째, 하천정비에 사용된 인공구조물인 시설물에 대한 평가에 있어 투입 에너지 및 원 부자재에 대한 환경영향을 정량화 하였다. 넷째, 이렇게 정량화된 결과를 전과정평가(LCA)기법을 이용하여 통합하는 방법론을 제시하고 이를 현재 하천환경정비사업이 이루어지고 있는 하천을 대상으로 검증해보았다. 본 연구에서는 기존의 모니터링 방법과 달리 LCA를 이용한 8가지 범주(자원고갈, 지구온난화, 광화학물 생성, 산성화, 오존층파괴, 부영양화, 생태독성, 인간독성)로 환경전반에 걸쳐 평가 분석함으로써 모니터링의 질적 향상과 이후 하천연구의 중요한 기초자료로 활용가능 할 것이며, 하천 정비사업에 적용된 공법들의 전과정평가(LCA)를 통해 각 영향범주별로 환경성을 파악하여 이후 유지보수(태풍·홍수시)에 친환경적 공법 선정에 도움이 될 것이다.

II. 연구 방법

본 연구는 하천의 환경을 정량적으로 평가하기 위해 산업 자원부에서 개발한 한국형 환경영향평가 지수 방법론(박기학 외, 2007) 표 1을 적용하여 전과정평가 방법으로 시설물 분야, 수질분야를 평가 하였으며, 생태분야는 종풍부도와 종개체수, 그리고 하천정비 면적을 고려하여 분석하였다. 하천정비에 사용된 시설물의 목록분석을 하였고, 고려한 영향범주(impact category)는 자원고갈(abiotic resource depletion, ARD), 지구온난화(global warming, GW), 오존층 파괴(ozone layer

표 1. 환경영향 평가지수

$E \cdot I = \sum(LCI\ result \times Ci \times I / \exists \times Wi)$	
$Wi = Ni / Ti \times fi$	
Ci:	characterization factor
Ni:	normalization results
Ni/Ti:	reduction factor
fi:	relative significance factor
Wi:	weighting factor

depletion, OD), 산성화(acidification, AC), 부영양화(eutrophication, EUT), 광화학산화물 형성(photochemical oxidant creation, POC), 인간독성(human toxicity, HT), 생태독성(eco toxicity, ET)의 총 8개 영향범주를 고려하여 분석하였고 기존의 인공하천과 자연형 하천으로 정비하였을 때의 환경영향을 분석하여 변화를 살펴보았다.

하천의 수질변화는 실측 데이터를 이용하여 공사 전·후의 환경영향을 전과정평가(LCA) 방법론으로 특성화, 정규화, 가중치부여 과정을 거쳐 부영양화 지수로 정량화 하였으며 하천의 자정작용 능력과 수질 향상을 살펴보았다. 생태분야는 대상지역에서 조사된 생물종의 종풍부도와 면적을 고려하여 각각 식생, 어류, 조류에 대해 특성화, 가중치부여 단계로 정량화 하였다. 생태계에 대한 가중치를 적용하여 통합하는 일은 매우 어려운 일이며, 또한 하천의 특징을 고려하여 주요 생태계를 도출하는 방법 또한 논란의 여지가 많다. 따라서 본 연구에서는 하천 생태계를 통합하기 위해 방법을 가정하여 적용·정량화 한 것이며, 생태계를 통합하는 연구는 계속 이루어져야 할 것으로 사료된다.

본 연구는 섬진강 수계의 경천시범 하천정비사업 구간을 사례 분석하였으며, 하천의 기능을 유지하기 위한 시설물, 수계투입산출물, 생태계의 영향을 고려하여 30년간 유지되는 것을 기준으로 평가하였고 본 연구에서의 전과정평가 1 Pt의 개념(무차원)은 수계배출물로 인산질 비료 112.74 kg, 또는 질소질 비료 821 kg을 하천수계에 버리는 정도의 환경영향이며, 디젤(경유) 2,242.152 kg(2,681.36 리터)를 생산을 포함하여 연소시킬 때 발생하는 환경부하량 정도로 해석될 수 있다.

1. 시설물에 대한 LCA 방법 및 평가대상

하천 시설물의 환경영향을 평가하기 위해 하천정비에 사용된 원부자재 및 에너지에 대해 각 공법별로 투입산출물을 분석하였다. 각 공법별, 구간별로 하천 시설물에 대한 환경적 영향을 분석하였으며 호안 전체에 대한 환경성을 분석하였다. 하천의 시

설물 LCA를 평가하기 위해 산업 자원부에서 개발한 한국형 환경영향평가지수 방법론을 사용하였으며, 고려한 영향범주는 위에서처럼 총 8개 영향범주를 고려하였다.

하천정비 사업은 많은 건설자재 및 장비(에너지)가 투입되는 사업이며, 본 사업에 투입된 건설자재 및 에너지의 사용은 설계에 따른 수량산출서 및 2004년 건설표준품셈을 이용하여 산출하였다. 산출된 에너지는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 배출계수를 이용하여 대기배출량을 산출하였다. 각 시설물의 목록분석결과를 LCA 수행절차에 맞게 수행하였으며, 산업자원부·환경부 국가 LCI 데이터베이스와 연결하여 환경영향을 평가하였다. 본 연구에서 적용된 시설물은 하도정비공사 수량산출서를 바탕으로 설계값을 적용하여 전과정목록분석을 하였다. 적용 시설물은 저수로공(토공, 저수호안공, 하중도공, 거석배치공, 거석 및 통나무배치공, 여울공, 징검다리공, 실개천공), 고수부지조성공, 구조물공, 부대공 등이다. 하천정비구간은 좌안(3구간)과 우안(3구간)으로 구분되며 각 구간별 다양한 형태의 공법이 적용되어 있다. 본 연구에서는 각각 구간별 공법을 전과정평가 수행하였으며, 이를 통합하여 시설물 전체에 대한 전과정평가를 분석하였다. 또한 하천 시설물의 기능을 유지하기 위한 하천구조물은 한번 공사후 일정기간 지속성을 갖기 때문에 하천구조물에 사용된 원부자재의 내구년한을 30 년으로 적용하여 전과정평가를 분석하였다. 그리고 하천의 시설물의 유지보수율을 15%(소하천 유지보수율 : 증평군 소하천 정비사례 적용) 적용하여 하천의 유지관리에 초기 투입 원부자재의 15%가 추가 투입되는 것으로 분석하여 이후 유지관리의 환경부하가 발생하는 것으로 가정하여 평가분석 하였다. 즉, 하천 초기시공에 대한 환경성과 하천의 유지보수에 대해 전과정평가를 분석하였다.

2. 수질분야에 대한 LCA 및 평가대상

하천의 수계투입산출물을 정량적으로 통합평가

표 2. 공사전·후의 BOD, T-N, T-P 변화

구 분	BOD (kg/year)		T-N (kg/year)		T-P (kg/year)	
	공사전	공사후	공사전	공사후	공사전	공사후
옥천교	28,288	14,817	28,288	14,817	28,288	14,817
순창교	87,938	25,008	87,938	25,008	87,938	25,008
경천교	87,938	26,121	87,938	26,121	87,938	26,121
사정교	114,791	23,807	114,791	23,807	114,791	23,807
합류점	47,146	21,699	47,146	21,699	47,146	21,699

하기위해 산업 자원부에서 개발한 한국형 환경영향 평가지수 방법론을 사용하였으며, 부영양화를 고려하였다.

본 연구에서는 기존과 달리 유량을 고려하여 오염부하 총량을 산출하였고 전과정평가를 분석하기 위해 BOD, TN, TP 등의 오염물질이 수질의 부영양화에 미치는 정도를 정량화 하였다. LCA를 수행하기 위해 일일 오염부하량을 연간부하량으로 환산하여 적용하였으며, 수질자료는 기존 모니터링 수질보고서를 이용하여 산정하였다. 수질분야에서는 BOD, T-N, T-P 등의 오염물질이 수계의 부영양화에 미치는 정도를 정량화 하였다. LCA를 수행하기 위해 일일 오염부하량을 연간부하량으로 환산하여 적용하였다. 각각 하천수질 LCA 분석은 경천의 상류, 중류, 하류로 각각 옥천교, 순창교, 합류점에 대해 각각 부영양화를 정량화 하였고, 하천정비 구역을 유하하면서 자정되는 효과를 고려하여 부영양화 지수를 산출·분석하였다. 모니터링 자료를 분석한 결과 공사전·후의 수질농도 결과는 공사후 약간의 개선을 보이고 있다. 그러나 공사후 2년째의 유량의 급격한 증가로 인한 오염물질의 유입 등으로 부영양화가 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 이는 유량의 일시적인 증가로 공정한 비교분석에 형평성이 없으며, 따라서 공사전·후의 유역 강우량을 비교검토 한 후 공사전·후의 해당측정 평균 유량을 적용시켜 연구 구간의 부영양화지수를 비교 분석하였으며 공사전·후의 강수량에 의한 유량변화를 공사전(2000년)과 공사후(2002년)의 강수량 데이터를 분석하여 평균 유량을 산정하였고, 이후 공사전·후의 부영양화지수를 분석하였다.

평균 유량은 공사전·후의 전체평균 유량으로 모니터링 결과의 모든 데이터를 활용하여 적용하였다. 외부 유입에 의한 비점오염원은 강우에 의한 유입으로 볼 수 있으며, 공사전 연구 기간의 강우량은 1,256.9 mm(2000년), 공사후 강우량은 1,259.0 mm(2002년)로 나타났다. 따라서 공사전후의 평균 유량으로 일정한 것으로 가정하여 분석하였다.

3. 생태분야에 대한 LCA 및 평가대상

생태 및 자연을 정량적으로 평가하기란 매우 어렵고, 특히 하천주변의 생태를 정량화 하기란 더욱 어렵음이 있다. 기존의 사전환경성 검토 및 환경성을 평가하기 위한 방법으로 토지이용현황의 지도, 생태자연도, 녹지자연도 등 토지의 개발 및 이용현황에 대한 평가가 개발되어 있으나 대단히 정성적이며 주관적이다. 자연환경보전법에서 시행되고 있는 “생태자연도”는 산·하천·습지·호소·농지·도시 등에 대하여 자연환경을 생태적 가치, 자연성, 경관적 가치 등에 따라 각각 4개로 등급화하여 작성된 지도를 말하며 멸종위기의 야생동식물의 생존 여부 및 서식처에 중점을 둔 등급이다. 녹지자연도는 육지권과 수권으로 나누어 평가되고 있으며, 육지권은 개발지역, 완충지역, 보존지역으로 크게 3분화 되며 총 10개 등급으로 분리하며 평가 방법이 정성적이고 주관적이다. 그러나 수권에 대해서는 등급이 없는 실정이다. 하천의 모니터링에서 생태의 변화는 매우 중요하다. 현재 하천생태 모니터링에서 식생, 조류, 어패류, 양서류, 포유류, 저서생물까지 다양한 분야의 모니터링이 이루어지고 있다. 생태계의 변화를 나타내는 지수로서 종의 다양

성지수 및 종의 풍부도 지수는 생태계를 평가함에 있어 중요한 인자이며 또한 모니터링 결과를 해석함에 있어서 매우 중요한 요소이다. 기존의 생태 모니터링에서 사용한 우점도지수, 다양도지수, 풍부도 지수를 바탕으로, 하천생태계 변화의 종합적인 평가가 새롭게 이루어져야 할 것이다. 생태계 분야에서는 조류, 어류, 식생에 대한 조사 자료를 활용

표 3. 생태 분석 특성화 결과 및 가중치 인자

구분	특성화 결과		생태지표중요도	생태가중치	면적(ha)
	공사전	공사후			
조류	0.149	0.162	300	0.322	30
어류	0.129	0.131	500		
식생	0.046	0.064	200		

표 4. 조류의 다양도 지수 분석

구분		공사전	공사후
옥천교-순창교	총개체수	77	447
	종수	11	21
	다양도	1.72	2.33
순창교-경천교	총개체수	66	321
	종수	9	17
	다양도	1.63	2.2
경천교-사정교	총개체수	40	241
	종수	9	23
	다양도	1.79	2.39
상류구간	총개체수	33	379
	종수	12	21
	다양도	2.31	2.04

표 5. 공사시기별 어류 변화

구분	공사전	공사중	공사후	
총개체수	292	1,579	760	301
종수	23	24	27	17
풍부도지수	3.88	3.12	3.92	2.80

표 6. 대상지역과 섬진강 수계의 생태정량화

구분	중간중요도		중풍부도/30ha		생태가중치*중풍부도/ha		생태가중치 (0.322)	종합생태지수(30년고려)	
			공사전	공사후	공사전	공사후		공사전	공사후
경천 생태계	식생	200	0.046	0.064	9.13	12.73	118.37	1143.48	1222.68
	어류	500	0.129	0.131	44.65	48.51			
	조류	300	0.149	0.162	64.59	65.33			
섬진 강수계	식생	200	0.049		9.73		162.58	1570.5	
	어류	500	0.142		71.14				
	조류	300	0.272		81.71				

하여 각각 생태지수를 분석하였다. 하천을 구성하는 생태계는 다양하나 조사된 데이터의 한계 및 정성적으로 표현된 데이터의 본 연구에서 제외하였다. 식생에 대한 총개체수는 어류 및 조류의 패턴으로 임의의 값을 적용하여 분석하였다. 또한 조류(300), 어류(500), 식생(200)에 대한 가중치를 부여하였다. 어류의 경우 이동성이 조류에 비해 상대적으로 적으며, 하천생태에 중요한 인자로 평가 될 수 있고, 조류는 상대적으로 먹이사슬관계에서는 상위에 있으나, 이동성이 많아 중요 지표로 하기에는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다. 그리고 식생에 대한 가중치는 계절 변화 및 하천의 변화(홍수, 태풍)에 대해 민감하게 반응하며 상대적으로 안정도가 낮아 하천의 중요 지표로 작용하기에는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 조류, 어류, 식생에 대한 가중치를 적용함으로써 생태를 포괄적으로 평가하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 시설물 전과정평가 결과

1) 하천정비에 투입된 시설물의 주요자재별 환경영향

시설물의 LCA를 평가한 결과 원부자재의 사용에 의한 자원고갈 및 원부자재를 생산하기 위해 사용된 에너지 및 시공시 사용된 에너지 등 지구온난화의 영향이 큰 것으로 분석되었다. 환경부하가 크게 나타난 원·부자재로는 레미콘, 돌망태, 자갈 순으로 분석되었다. 원·부자재별 자원고갈의 특성화 결과를 보면, 레미콘에 의한 환경영향(1.97E+07 1/yr)

표 7. 시설물 전과정평가 결과

환경영향범주	단위	특성화		정규화		가중치		
		공사전	공사후	공사전	공사후	공사전	공사후	
시설물	ARD	1/yr	8.20E+06	2.99E+06	3.30E+02	1.20E+02	87.515	31.97
	GW	g CO2-eq	2.00E+09	5.95E+08	3.62E+02	1.08E+02	119.6	35.65
	OD	g CFC-11 eq	2.14E+02	1.64E+01	5.25E+00	4.04E-01	1.7595	0.1357
	AC	g ethylene	4.97E+06	4.43E+05	4.83E+02	4.31E+01	36.11	3.22
	EU	g SO2 eq	2.47E+06	2.21E+06	6.20E+01	5.54E+01	2.5645	2.3
	POC	g PO4-3 eq	4.16E+05	2.43E+05	3.17E+01	1.86E+01	1.3915	0.81075
	HT	g DCB1,4 eq	5.73E+06	3.32E+06	8.66E+00	5.02E+00	2.6335	1.518
	ET	g DCB1,4 eq	5.26E+07	8.10E+06	7.05E+02	1.09E+02	201.25	30.935

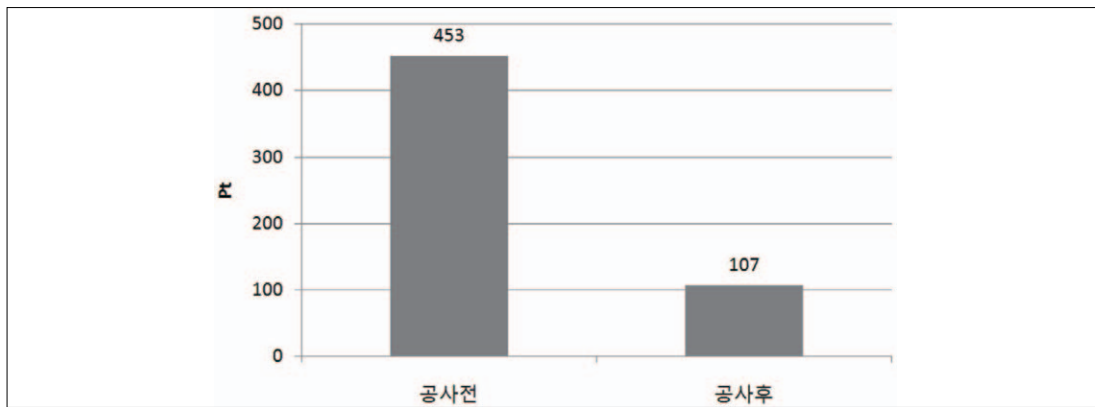


그림 1. 인공하천과 자연형 하천간의 환경부하 비교(전과정평가)

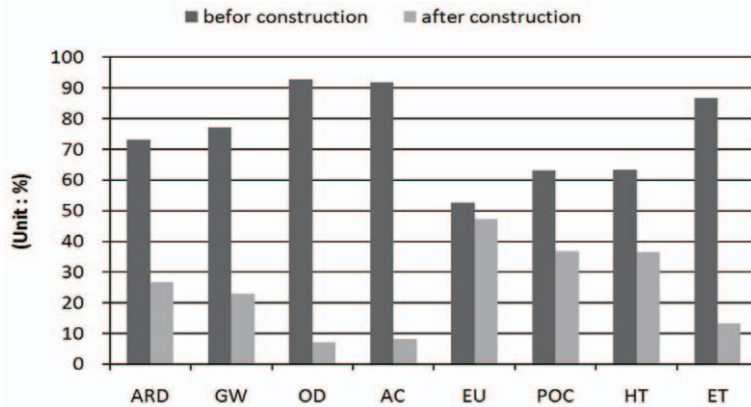


그림 2. 인공하천과 자연형 하천간의 환경부하 발생(가중치결과)

이 가장 큰 것으로 분석되었고, 부영양화는 레미콘, 자갈, 돌망태 순으로 분석되었다. 경천 하천정비 전 체구간에서의 환경영향의 주요 이슈는 자원고갈, 지구온난화, 생태독성, 산성화 순으로 분석되었으며, 지구온난화의 특성화 결과 5.95E+08 CO₂-eq으로

분석되었으며, 대부분 하천의 호안정비시 에너지 사용으로 인해 발생한 것으로 나타났다.

경천 정비후 전과정평가(LCA) 가중치부여 결과 지구온난화 36 Pt, 자원고갈 32 Pt, 생태독성 31 Pt로 전체 환경영향 107 Pt 중 92.5 %의 환경영향

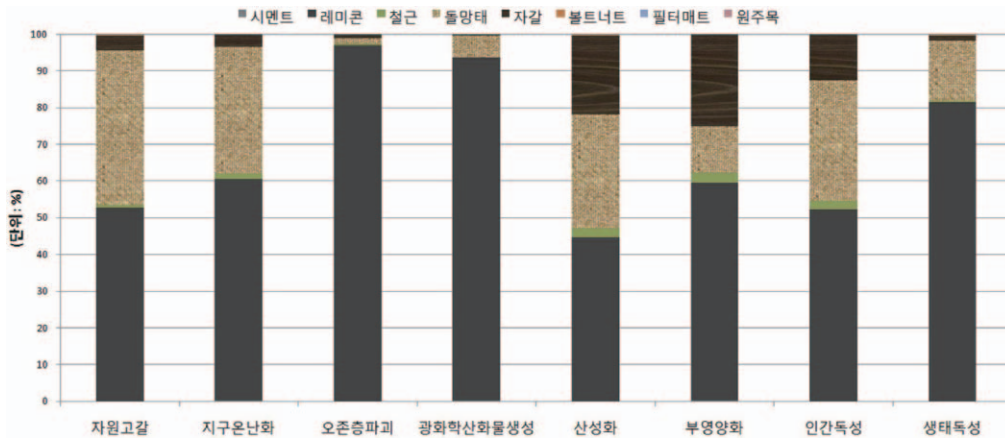


그림 3. 하천정비에 투입된 시설물의 주요자재별 환경영향 특성화 결과

표 8. 경천 하천정비 전후에 대한 전과정평가 가중치결과

환경영향범주	단위	공사전	공사후
ARD	Pt	8.75E+01	3.20E+01
GW	Pt	1.20E+02	3.57E+01
OD	Pt	1.76E+00	1.36E-01
AC	Pt	3.61E+01	3.22E+00
EU	Pt	2.56E+00	2.30E+00
POC	Pt	1.39E+00	8.11E-01
HT	Pt	2.63E+00	1.52E+00
ET	Pt	2.01E+02	3.09E+01

을 차지하는 것으로 분석되었다. 하천정비 좌우측 호안의 환경성 평가 결과 우측호안은 25.6 Pt, 좌측 호안은 67.1 Pt로 각각 분석되었고, 공법별로 볼 때 거석 및 통나무공법 1.95 Pt, 거석배치공 0.324 Pt, 하중도공 0.445 Pt의 환경부하가 발생하는 것으로 분석되었다.

경천의 자연형 하천으로 정비 후 인공하천과 비교하여 볼 때 환경영향의 가중치를 부여하여 단일

표 9. 하천정비에 투입된 시설물의 주요자재별 환경영향 특성화 결과표

환경영향범주	단위	시멘트	레미콘	철근	돌망태	자갈	볼트너트	필터매트	원주목
ARD	1/yr	1.42E+04	1.97E+07	3.09E+05	1.57E+07	1.54E+06	9.15E+04	2.11E+04	4.83E+03
GW	g CO2-eq	1.58E+07	5.47E+09	1.14E+08	3.13E+09	2.94E+08	1.09E+07	8.31E+05	5.57E+05
OD	g CFC-11 eq	2.62E-01	6.27E+02	2.30E+00	9.81E+00	6.80E+00	8.37E-02	1.99E-02	2.99E-03
AC	g ethylene	4.43E+04	1.45E+07	7.60E+03	9.08E+05	5.40E+04	2.79E+03	1.53E+03	3.48E+02
EU	g SO2 eq	1.15E+04	6.50E+06	3.63E+05	4.52E+06	3.14E+06	2.06E+04	1.39E+03	1.26E+04
POC	g PO4-3 eq	2.43E+03	1.08E+06	4.64E+04	2.29E+05	4.53E+05	1.37E+03	2.76E+02	1.26E+03
HT	g DCB1,4 eq	3.90E+04	1.59E+07	7.42E+05	1.00E+07	3.75E+06	3.42E+04	3.09E+03	1.48E+04
ET	g DCB1,4 eq	7.25E+04	1.54E+08	6.01E+05	3.09E+07	2.89E+06	5.73E+05	9.24E+03	1.76E+03

표 10. 주요 자재별 정규화 결과표

환경영향범주	시멘트	레미콘	철근	돌망태	자갈	볼트너트	필터매트	원주목
ARD	5.7E-01	7.9E+02	1.2E+01	6.3E+02	6.2E+01	3.7E+00	8.5E-01	1.9E-01
GW	2.9E+00	9.9E+02	2.1E+01	5.7E+02	5.3E+01	2.0E+00	1.5E-01	1.0E-01
OD	6.5E-03	1.5E+01	5.7E-02	2.4E-01	1.7E-01	2.1E-03	4.9E-04	7.4E-05
AC	4.3E+00	1.4E+03	7.4E-01	8.8E+01	5.3E+00	2.7E-01	1.5E-01	3.4E-02
EU	2.9E-01	1.6E+02	9.1E+00	1.1E+02	7.9E+01	5.2E-01	3.5E-02	3.2E-01
POC	1.9E-01	8.2E+01	3.5E+00	1.7E+01	3.5E+01	1.1E-01	2.1E-02	9.6E-02
HT	5.9E-02	2.4E+01	1.1E+00	1.5E+01	5.7E+00	5.2E-02	4.7E-03	2.2E-02
ET	9.7E-01	2.1E+03	8.1E+00	4.1E+02	3.9E+01	7.7E+00	1.2E-01	2.4E-02

지수로 평가한 결과 76 %의 환경부하 절감효과를 얻을 수 있었다.

2) 호안의 환경영향

표 11, 그림 4 참고

표 11. 호안에 대한 특성화 결과표

환경영향 범주	단 위	합 계		
		호안 전체	'우' 구간 전체	'좌' 구간 전체
ARD	1/yr	2.99E+06	6.80E+05	2.31E+06
GW	g CO2-eq	5.95E+08	1.45E+08	4.50E+08
OD	g CFC-11 eq	1.64E+01	8.60E+00	7.82E+00
AC	g ethylene	4.43E+05	2.04E+05	2.40E+05
EU	g SO2 eq	2.21E+06	5.32E+05	1.68E+06
POC	g PO4-3 eq	2.43E+05	6.59E+04	1.77E+05
HT	g DCB1,4 eq	3.32E+06	7.99E+05	2.52E+06
ET	g DCB1,4 eq	8.10E+06	2.81E+06	5.29E+06

표 12. 자연형 하천 시공전·후의 특성화 결과표

환경영향범주	단 위	합 계	
		시공전	시공후
ARD	1/yr	8.20E+06	2.99E+06
GW	g CO2-eq	2.00E+09	5.95E+08
OD	g CFC-11 eq	2.14E+02	1.64E+01
AC	g ethylene	4.97E+06	4.43E+05
EU	g SO2 eq	2.47E+06	2.21E+06
POC	g PO4-3 eq	4.16E+05	2.43E+05
HT	g DCB1,4 eq	5.73E+06	3.32E+06
ET	g DCB1,4 eq	5.26E+07	8.10E+06

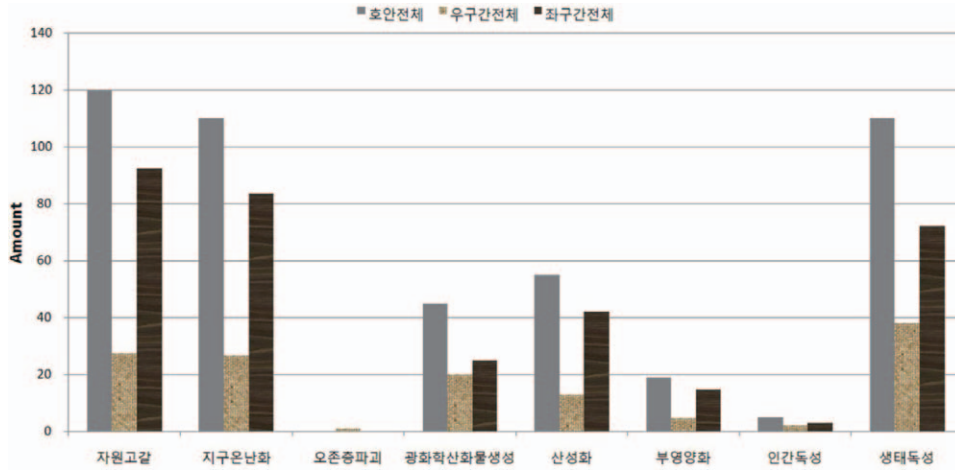


그림 4. 호안 전체 구간의 환경영향 정규화 결과

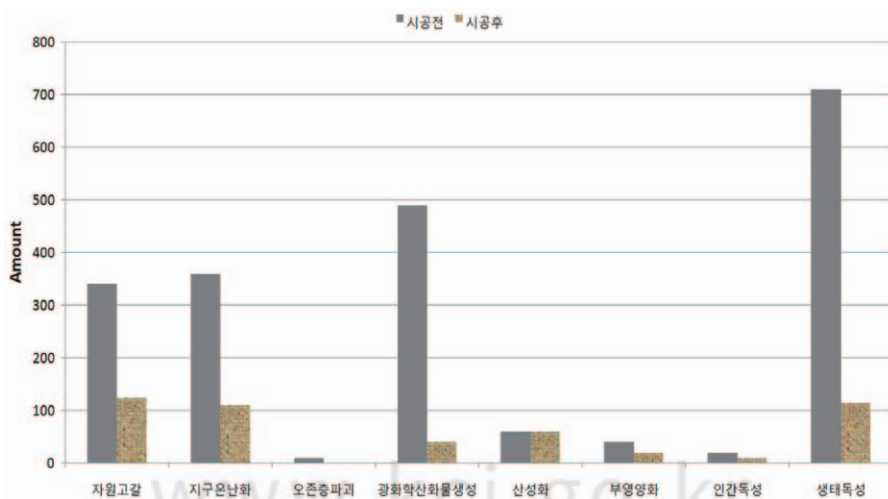


그림 5. 시공전·후 인공하천 호안의 정규화 결과

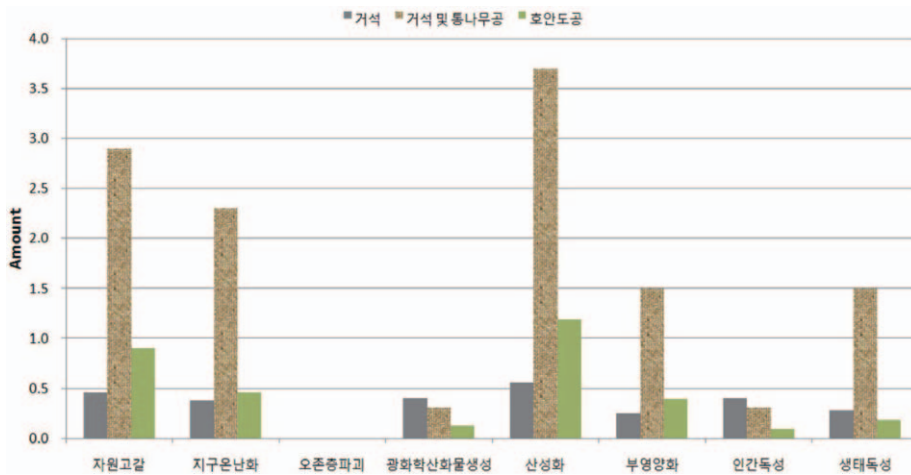


그림 6. 시공전·후 인공하천 호안의 정규화 결과

표 13. 거석, 거석 및 통나무공, 하중도공의 특성화 결과표

환경영향 범주	단 위	합 계		
		거석	거석및통나무공	하중도공
ARD	1/yr	1.12E+04	7.10E+04	1.93E+04
GW	g CO2-eq	2.12E+06	1.25E+07	2.56E+06
OD	g CFC-11 eq	4.74E-02	2.54E-01	2.86E-02
AC	g ethylene	3.77E+02	2.79E+03	1.20E+03
EU	g SO2 eq	2.20E+04	1.45E+05	4.69E+04
POC	g PO4-3 eq	3.18E+03	1.96E+04	5.09E+03
HT	g DCB1,4 eq	2.63E+04	1.72E+05	5.51E+04
ET	g DCB1,4 eq	2.03E+04	1.11E+05	1.37E+04

3) 시공전과 시공후 호안의 환경성평가

표 12, 그림 5 참고

4) 기타 시설물의 환경영향

표 13, 그림 6 참고

2. 수질 전과정평가 결과

부영양화 지수를 LCA 기법을 통해 분석한 결과 상류지역인 옥천교의 경우 공사전과 비교하여 볼 때 공사후의 부영양화 특성화값이 3.61E+6g PO₄-3eq 으로 나타났으며, 공사전보다 1.45E+7g PO₄-3eq 감소한 것으로 나타났다. 중류인 순창교에서는 공사전(2.17E+07g PO₄-3eq)보다 공사후(6.81E+06g

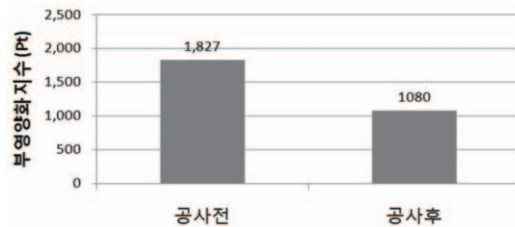


그림 7. 공사전·후 하천유지에 따른 수질환경영향 비교

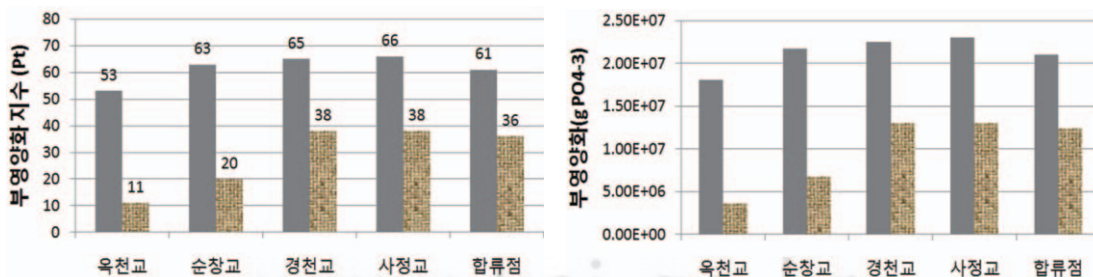


그림 8. 공사전·후 지점별 부영양화지수 변화 및 부영양화 특성화 결과

PO₄-3eq), 하류인 합류점은 공사전(2.1E+07g PO₄-3eq) 보다 공사후(1.24E+07g PO₄-3eq) 으 로 모든 지점에서 하천정비 후 수질이 개선되는 것 으로 분석되었다. 경천의 하천 정비 종점구간인 합 류점 구간에서의 수계 부영양화 지수를 분석·비교 평가 함으로써 하천 정비에 따른 효과를 부영양화 지수 변화로 평가하였다. Fig 10에서 보는 바와 같 이 하천의 부영양화 결과를 공사전·후를 비교하였 을 때 공사전 1,827 Pt에서 공사후 1,080 Pt로 하 천정비후 747 Pt(41%)의 부영양화 개선효과가 나 타났다. 이는 공사전 인공하천의 호안시설물에 대한 자정작용에 비해 공사후 자연형 하천으로 정비한 후 자정작용이 향상된 결과로 볼 수 있다. 또한 하천 정 비로 인하여 비점오염원의 유입이 기존 인공하천에 비해 크게 감소되었을 것으로 판단된다. 그림에 나 타난 부영양화지수는 하천을 30년간 같은 농도로 유지할 경우 발생하는 부영양화지수를 나타낸 것으 로 실제 발생될 자정작용을 고려한다면 하천의 부영 양화 지수는 크게 저감될 것으로 판단된다.

3. 생태계 전과과정평가 결과

하천 생태계를 공사전후로 나누어 분석하여 지수 화하였고, 또한 섬진강 수계의 전체 생태계지수를 분석하여 경천(하천정비구간)의 하천 생태와 비교하 여 전체적인 생태 Damage 지수를 분석하였다. 생 태계 분석을 위해 조류(300), 어류(500), 식생(200) 에 대한 가중치를 부여하였다. 어류의 경우 이동성 이 조류에 비해 상대적으로 적으며, 하천생태에 중 요한 인자로 평가 될 수 있고, 조류는 상대적으로 먹이사슬관계에서는 상위에 있으나, 이동성이 많아 중요 지표로 하기에는 다소 무리가 있을 것으로 판 단된다. 그리고 식생에 대한 가중치는 계절 변화 및 하천의 변화(홍수, 태풍)에 대해 민감하게 반응하며 상대적으로 안정도가 낮아 하천의 중요 지표로 작 용하기에는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다. 하 천정비구간에 대한 단위면적당 중풍부도를 분석한 결과 어류는 공사전(0.129), 공사후(0.131)로 분석 되었고, 조류는 공사전(0.149), 공사후(0.162), 식생

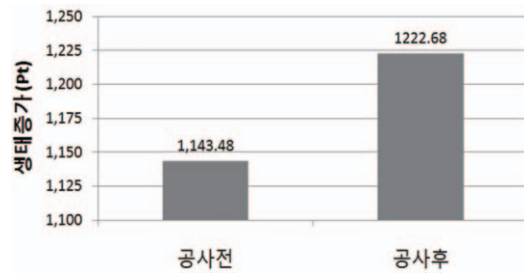


그림 9. 공사전·후에 대한 생태증가 지수 가중치 결과

은 공사전(0.046), 공사후(0.064) 각각 개선된 것으 로 분석되었다. 생태 분석에 세부항목으로 나누어 분석한 결과 조류의 특성화는 하천 정비후 3.86 Pt 증가하였으며, 어류는 0.74 Pt, 식생은 3.6 Pt 증가 한 것으로 분석되었다. 섬진강수계에 조사된 전체 유역의 어류 및 조류, 식생에 대하여 본 연구의 방 법론을 적용하여 수행한 결과 생태지수는 1,570 Pt 로 분석되었다. 섬진강 수계의 전체적인 하천생태 지수는 경천유역의 하천생태보다 종다양도 및 중풍 부도가 우위한 것으로 분석되었으며, 상대적으로 경천유역의 생태계는 섬진강 전체유역의 하천생태 계와 비교하여 볼 때 다소 빈약한 것으로 분석되었 다. 따라서 섬진강유역과 경천유역을 비교하여 생 태 Damage지수로서 분석하였고 생태적으로 안정 적인 상태의 기준을 섬진강 유역의 생태지수로 적 용하여 경천 정비 전후에 대한 생태계 Damage 를 비교분석하였다. 경천의 하천정비 전의 생태 지수 는 1,143 Pt로 섬진강 수계의 생태지수 1,570 Pt과 비교하여 볼 때 427 Pt의 Damage 지수로 분석되 었고, 하천정비 후 생태지수는 1,223 Pt로 347 Pt 의 Damage 지수로 분석되었다. 따라서 경천의 하 천 정비 이후 경천 생태계 및 섬진강 수계에 미치는 환경적인 영향을 비교 분석하여 볼 때 자연형 하천 으로 정비후 Damage 지수가 79.19 Pt 개선되어 생태계에 미치는 영양이 적어 하천환경이 개선된 것으로 분석되었다.

4. 하천 환경평가 결과

하천의 환경성을 종합적으로 평가하기 위해 시설

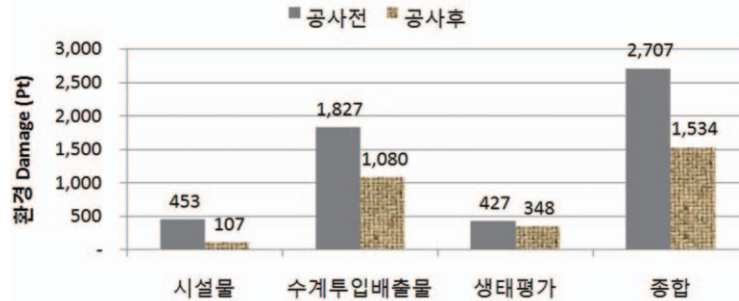


그림 10. 하천의 전과정평가(LCA) 결과

물, 수계투입산출물, 생태계에 대해 각각 분석하였으며 하천의 초기 시설물 투자에 의한 환경부하와 하천을 유지보수시 발생하는 원·부자재의 투입, 하천을 구성하는 수계투입산출물과 하천을 중심으로 구성된 하천생태계를 30 년간 지속 유지하는 것으로 분석하였고, 하천 시설물에 대한 유지보수율을 15%를 적용하였다. 하천정비구간(1.5 km)과 하천 모니터링구간(폭 200 M 가정)을 고려하여 평가하였다. 수계투입산출물 평가는 현재의 수질농도와 유량이 향후 30 년간 지속되는 것으로 분석하였으며, 정비이후 자정작용의 효과는 더 클 것으로 판단된다. 하천 시설물에 대한 정비전 인공하천과 비교하여 자연형하천으로 정비한 후 결과를 각각 비교하였으며, 이에 따라 변화되는 수계투입산출물 및 생태계를 고려하여 통합 평가 분석 하였다.

시설물의 환경 Damage지수는 정비전 453 Pt에서 정비후 107 Pt로 Damage지수가 346 Pt로 감소함을 볼 수 있었다. 시설물의 LCA를 평가한 결과 원·부자재의 사용에 의한 자원고갈 및 원부자재를 생산하기 위해 사용된 에너지 및 시공시 사용된 에너지 등 지구온난화의 영향이 큰 것으로 분석되었다. 환경부하가 크게 나타난 원·부자재로는 레미콘, 돌망태, 자갈 순으로 환경영향이 크게 나타난 것으로 분석되었다. 따라서 기존의 인공하천의 주재료인 콘크리트와 비교해 볼 때 자연형하천으로 정비한 이후 환경이 크게 개선됨을 볼 수 있었다. 수계투입산출물에 대한 환경 Damage 지수는 747 Pt 개선되어 자연형 하천으로 정비후 자정작용이 크게 향상되었음을 알 수 있다. 생태부분의

Damage지수도 79 Pt 개선됨으로 정비후 시설물, 수계투입산출물, 생태부분 모두 개선되었음을 볼 수 있었다. 또한 하천의 수질 정화로 인한 하천생태계는 더욱 개선될 것으로 판단된다.

하천환경을 전과정평가(LCA)를 통해 각각 시설물, 수계투입산출물, 생태계로 나누어 분석하였다. 환경성평가 결과 공사전보다 자연형 하천으로 정비한 후 환경성이 1,172 Pt 개선된 것으로 분석되었다.

IV. 결론

본 연구는 기존의 콘크리트 인공하천과 자연형 하천으로 정비한 이후의 하천환경을 각각 정량화 하였다. 자연형 하천으로 정비함에 따라 시설물의 경우 453 Pt(공사전)에서 107 Pt(공사후)로, 수질은 1,827 Pt(공사전)에서 1,080 Pt(공사후), 생태계는 427 Pt(공사전)에서 348 Pt(공사후)로 환경부하가 감소되어 하천정비 후 좋아진 것으로 분석 되었다. 기존의 모니터링 방법과 달리 전과정평가를 이용하여 환경전반에 걸쳐 평가 분석을 시도 함으로써 새로운 모니터링 방법과 하천 정비사업시 각 영향범주별로 환경성을 파악하여 이후 유지보수에 친환경적 공법 선정에 도움이 되리라 판단된다.

본 연구에서 생태계를 정량화 하기위한 방법으로 적용된 방법을 더욱 보완하는 연구가 추후 진행 되어야 할 것이다. 현재 다양한 방법의 생태계 평가가 이루어지고 있지만 서로 다른 종에 대한 통합적인 평가는 이루어지고 있지 않다. 또한 하천 및 환경의 특징이 서로 상이함에 따라 대표종을 찾기에는 어

려움이 많을 것이다. 따라서 국내 하천 환경에 맞는 연구는 물론 복합적인 환경을 정량화하여 평가하기 위해서는 생태계의 정량화가 반드시 선행되어야 할 것이다. 또한 각 하천환경 및 하도특성에 따라 생태계의 변화를 정량화하는 방법의 연구는 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 또한 분야별 시설물, 수질, 생태 등 기초자료의 데이터베이스 구축과 함께 하천 수계별, 계절별, 국가적 차원의 생태지도 및 생태지수분석이 더욱 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

- 박제철, 오영택, 배상득, 류동경, 박홍열, 2004, 위천의 생태환경 및 비오톱 평가(Evaluation for Environment and Biotope in Yeicheon Stream), 공동 춘계학술발표회 논문집, 한국물환경학회·대한상하수도학회지, 649-652.
- 배연재, 원두희, 이용재, 승현우, 2003, 하천생태계에 대한 환경평가 기법과 생물 다양성 관리 시스템의 개발 및 적용, 한국환경생물학회지, 21(3), 223-233.
- 박진원, 마호섭, 2003, 양재천의 식생현황과 하천자연도 평가, 경상대학교 농업생명과학연구원, 37(2), 1,225-1,909.
- 이준호, 강태호, 성영두, 윤세의, 2003, 하천복원을 위한 하천평가기법의 적용성 연구, 한국방재학회지, 3(4), 131-143.
- 이진희, 김훈희., 1998, 도시하천에 있어서 생태적 복원을 위한 주민 평가에 관한 연구, 상명대학교 산업과학연구소, 1-10.
- 산업자원부, 2004, Life Cycle Assessment ISO 14040 시리즈 실무지침, 산업자원부

최종원고채택 12. 02. 07